

# FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS BIOMÉDICOS COM TENDÊNCIA ISOTÉRMICA

Cristiano Meneghini\*  
Jeferson R. Gatti\*\*

## RESUMO

O presente estudo aborda uma nova ferramenta para o dimensionamento de paredes isolantes, voltadas a equipamentos biomédicos que trabalhem com células vivas em seu interior, tendo a necessidade de um sistema com tendência isotérmica, pois a mudança de temperatura no interior do equipamento pode causar danos ao material biológico, como no caso das células espermáticas. Esses equipamentos devem apresentar uma mínima variação térmica perdida para o meio externo, pois trabalham com baixas temperaturas. Dessa forma, este estudo será de suma importância para aplicação em um equipamento desenvolvido para inseminação artificial em suínos, e assim garantir que a nova tecnologia desempenhe suas funções em um sistema com tendência isotérmica, pois tendo um sistema sem perdas, é possível estender o tempo de vida das células mantidas e processadas em seu interior. Com essa perspectiva, foi realizado um estudo sobre os isolantes térmicos utilizados atualmente em equipamentos que trabalham com elevada variação de temperatura ( $\Delta T$ ) para, assim, encontrar um parâmetro de base para atender ao sistema funcional da nova tecnologia, possibilitando o correto dimensionamento das paredes do novo produto, com isolamento superior ao encontrado atualmente nos melhores casos. Com base nesses dados, foi executado o cálculo de fluxo térmico  $q$  para chegar a um valor padrão dessa variável. O melhor valor de  $q$  encontrado foi no material poliuretano de espessura 0,07 m, em que  $q = 185,43 \text{ W/m}^2$ . Após os cálculos, foi estabelecido que esse valor deveria ter um aumento de 20% de eficiência, ficando em  $q_{+20\%} = 148,34 \text{ W/m}^2$ , para, assim, haver uma tendência isotérmica, tornando as paredes do novo equipamento viáveis tecnicamente. Com o  $q_{+20\%}$  padrão estabelecido, ele foi aplicado aos quatro isolantes identificados nos demais equipamentos existentes, gerando equações e um gráfico para servirem como ferramenta de fácil aplicação, considerando somente o material e o gradiente de temperatura desejado para obter a espessura de parede com tendência isotérmica, que poderá ser aplicada em eletrodomésticos, equipamentos biomédicos e outros que tenham as mesmas características funcionais.

Palavras-chave: Isolante térmico. Motilidade espermática. Gradiente de temperatura.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o desenvolvimento tecnológico fundamenta-se em materiais de qualidade que aperfeiçoem o funcionamento de produtos inovadores, garantindo um alto desempenho. No que se refere a tecnologias voltadas para processos que utilizem material biológico de alta sensibilidade, esta preocupação tem peso significativo para a segurança funcional do equipamento.

Com a crescente demanda dos produtos da indústria alimentícia, buscam-se soluções eficazes para se conseguir um alto nível de eficiência na inseminação artificial para reprodução de animais. Com esta perspectiva, desenvolveu-se uma nova tecnologia que traz eficiência ao processo de inseminação artificial e que utiliza células espermáticas em seu processamento. No trabalho de Gatti et al. (2014, p. 1), pode-se verificar mais detalhes desse desenvolvimento.

Nessa nova etapa, o equipamento passa por um refinamento no sistema de isolamento térmica, sendo o objetivo do presente estudo, pois o equipamento necessita de isolamento térmico eficiente para que possa desempenhar a função para o qual fora projetado e, assim, resulte em um sistema isotérmico e de alta eficiência.

\* Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor do Curso de Engenharia Mecânica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; cristiano.meneghini@unoesc.edu.br

\*\* Graduado em Engenharia de Produção Mecânica pela Universidade do Oeste de Santa Catarina; mestrando em Ciência e Biotecnologia pela Universidade do Oeste de Santa Catarina; jefersongatti@hotmail.com

Todos os processos utilizando células vivas, como é o caso da célula espermática, precisam ser isotérmicos, para que não ocorram danos na fisiologia celular. O que se tem empregado neste segmento para se deixar o sistema isotérmico são os isolantes, como é o caso do poliestireno expandido (popular isopor). Além disso, também é utilizada a lã de vidro e, em algumas aplicações, o poliuretano. Porém, não existe uma padronização, o que requer um estudo específico conforme a aplicação.

O isolante térmico, nesse caso, terá função importante, pois além de sua função básica, deve ter baixo custo e ser construtivamente flexível ao novo equipamento. Tendo atendido esses requisitos, o material isolante poderá ser padronizado ou até mesmo servir de base para novos projetos.

Dessa forma, o presente estudo foi focado em utilizar isolantes comercialmente simples, facilitando, assim, o atendimento dos requisitos do projeto da nova tecnologia do estudo em questão e, também, proporcionando a evolução dos novos modelos e aplicações.

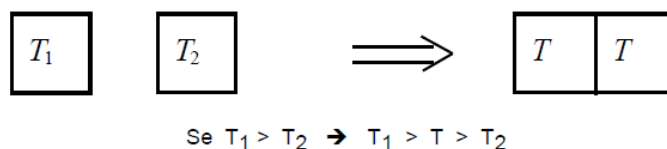
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sêmen deve ser armazenado em temperaturas que minimizem o consumo de energia. Temperaturas entre 15 e 18 °C são as mais usuais quando o sêmen é estocado para fins comerciais, mas este apresenta limitações quando estocado por longos períodos, pois continua produzindo metabólitos, os quais se acumulam e interferem na motilidade espermática. Também, as baixas temperaturas não impedem a multiplicação de bactérias durante o período de armazenamento do sêmen, sendo de extrema importância todos os processos serem isotérmicos (GONÇALVES; FIGUEIREDO; FREITAS, 2008, p. 1). Hou et al. (2002, p. 1349) afirmam que o sêmen diluído tem uma vida relativamente curta, isso independente do tipo de diluidor, pois, gradativamente, os espermatozoides vão consumindo os nutrientes disponíveis no diluidor. Segundo Corrêa et al. (2001, p. 90) e Hou et al. (2002, p. 1345), quanto maior o tempo de armazenamento do sêmen, menor poderá ser sua fertilidade, pois há um prejuízo de motilidade e também um aumento de danos da membrana, provenientes da estocagem, alterações na permeabilidade de sua membrana e a liberação de substâncias intracelular.

O sêmen suíno é caracterizado pela baixa viabilidade quando armazenado por um período superior a cinco dias, segundo Johnson et al. (2000 p. 250) e Yoshida (2000, p. 350). As quedas rápidas e diretas (sem incubação em temperaturas intermediárias) da temperatura (35 a 17 °C) causam perdas à qualidade dos espermatozoides, enquanto o abaixamento lento (com incubação em temperaturas intermediárias) fornece resistência à célula espermática (WATSON; PLUMMER, 1990, p. 187). Segundo De Leeuw, Colenbrander e Verkleij (1990, p. 99), o resfriamento causa alterações na célula espermática, como o decréscimo da atividade respiratória e da glicólise, a perda da motilidade e a redução da ATP (adenosina trifosfato).

De acordo com Çengel (2009, p. 25), o fenômeno transitório de troca de calor que ocorre entre dois meios é denominado transferência de calor, que ocorre por consequência da energia em trânsito obtida por um gradiente de temperatura entre um meio e outro. Se forem considerados dois corpos que tenham temperaturas diferentes e estes forem colocados em contato físico, trocarão calor até que ocorra o equilíbrio de temperatura entre eles, observando-se que o fluxo de transferência ocorrerá do corpo de temperatura mais elevada para o de menor temperatura, como mostra o Esquema 1.

Esquema 1 – Sistema em equilíbrio térmico



Fonte: adaptado de Çengel (2009).

Segundo Çengel (2009, p. 25), o processo de transferência de calor é finito, ocorrendo até que os dois corpos entrem em equilíbrio. Os diferentes processos de transferência de calor são ditos como mecanismos de transferência de calor, chamados de convecção, radiação e condução. A transferência de calor por convecção é realizada pelo trânsito de energia térmica que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento, e esta é dividida em duas maneiras, a convecção livre ou natural e a forçada. A convecção natural ocorre por diferença de densidade entre fluidos, e a convecção forçada ocorre quando é resultado do movimento provocado por algum agente externo, como ventiladores, ventos atmosféricos ou bombas.

A transferência de calor por radiação pode ser imitada por uma superfície sólida, líquidos e gases. Esse movimento de calor pode ocorrer quando da ausência de um meio interveniente, em que existe uma troca em forma de ondas eletromagnéticas entre as duas superfícies a diferentes temperaturas, e ocorre com maior eficiência no vácuo (INCROPERA et al., 2008, p. 6). E, por último, a transferência de calor por condução é quando o trânsito de energia ocorre por consequência da interação entre partículas, sendo transferida das partículas de maior energia para as de menor energia, através de um meio físico qualquer, sólido ou líquido (INCROPERA et al., 2008, p. 5).

No presente estudo, o mecanismo de transferência de calor dominante é a condução e, por isso, dar-se-á ênfase a este fenômeno. Para a condução térmica, a equação é conhecida como Lei de Fourier, que é empregada para parede plana unidimensional, dada pela Equação (1) (INCROPERA et al., 2008, p. 3):

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

em que  $q_x''$  é o fluxo térmico em  $W/m^2$ ,  $k$  é a condutividade térmica do material em  $W/m.K$ , e  $dT/dx$  é a derivada da temperatura em relação à direção  $x$ , que pode ser representada por:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2)$$

em que  $L$  é o comprimento característico do material condutor em metros,  $T_2$  é a temperatura externa do material, e  $T_1$  é a temperatura interna do material. Assim, o fluxo térmico pode ser representado por:

$$q_x'' = -k \frac{(T_2 - T_1)}{L} \quad (3)$$

Denomina-se isolante térmico toda estrutura física ou material físico que proporciona uma barreira à dissipação do calor, ou seja, uma resistência térmica. Essa barreira possibilita que dois meios trabalhem com temperaturas diferentes sem que um interfira no meio do outro, desde que o isolante térmico esteja corretamente dimensionado (MILCENT, 2007, p. 6). Na teoria, o melhor isolante térmico é o vácuo, porém pouco empregado pelas suas limitações técnicas. Os isolantes podem ser encontrados em forma de flocos, pó, fibra, lã de rocha, lã de vidro, entre outros. No caso de estruturas rígidas, semi-rígidas e aglomerados de resina flexíveis, podem ser constituídos por materiais de diferentes densidades, como lã de rocha, silicato de cálcio, poliestireno, poliuretano, entre outros (MILCENT, 2007, p. 6).

Os isolamentos térmicos são selecionados conforme aplicação e suas espessuras determinadas por cálculos matemáticos e têm uma tendência isotérmica quanto mais se aproximam da espessura máxima considerada isotérmica. No caso de trabalho com temperaturas abaixo da temperatura ambiente deve-se tomar cuidado principalmente em relação à possível formação de condensado nas partes expostas à temperatura mais alta que a temperatura interna do equipamento aplicado. Dessa forma, é preciso conhecer todas as temperaturas de trabalho para um correto dimensionamento de sua isolamento por condução, que é o principal mecanismo a ser considerado (SPIRAX SARCO, 2010, p. 10).

No caso de equipamentos para laboratório, eletrodomésticos e de dimensões reduzidas, são comumente empregados lã de rocha, lã de vidro, fibra cerâmica, folhas em alumínio, EPS (isopor), espuma elastomérica e espuma expandida de poliuretano. A Tabela 1 mostra os valores correspondentes de condutividade térmica para alguns materiais mais comuns.

Incropera et al. (2008, p. 43) destacam que os isolantes térmicos possuem algumas características que os diferenciam de outros materiais, como o baixo valor de sua condutividade térmica, baixa capacidade higroscópica, baixa massa específica e estabilidade química.

No Brasil, existe um programa de eficiência energética para equipamentos que consomem menos energia para funcionar, e uma das condições para que isso ocorra, no caso de refrigeradores e *freezers*, é ter uma boa isolamento térmica. A classificação inicia em A (o mais eficiente) e segue até o G (o menos eficiente) (INMETRO, 2016, p. 1).

Tabela 1 – Valores de condutividade térmica (k) para diferentes materiais

Material	k (W/m.K)
Alumínio	230
Aço	47
Concreto	1,74
Tijolo maciço	0,81
Fibrocimento	0,76
Água	0,64
Palha	0,12
Lã de Vidro	0,036
Poliestireno expandido	0,035
Lã de rocha	0,032
Ar	0,023
Espuma de poliuretano	0,020

Fonte: adaptado de Baêta e Souza (1997, p. 269), Laboratório de Propriedades Termofísicas (2016) e Texsa (2016, p. 1).

### 3 METODOLOGIA

As soluções numéricas foram obtidas a partir da Equação 1 e resultam nos valores de espessura  $L$  e fluxo térmico  $q_x''$ . Para a base de dados, utilizou-se a Tabela 1, que traz o valor de  $k$  dos materiais mais utilizados comercialmente em eletrodomésticos e equipamentos para laboratório.

Outras informações foram obtidas de empresas privadas que forneceram todos os dados de espessura comumente utilizada em eletrodomésticos para padronizar um fluxo térmico  $q_x''$  desejável e com tendência isotérmica, a partir de refrigeradores e *freezers* que funcionam com sistema *frost freezing* e que possuíam a classificação “A”, certificados pelo INMETRO (2016, p. 1). Cerca de 40 produtos foram mensurados, para obter a espessura de classificação “A”, de menor taxa de fluxo de calor  $q_x''$ , utilizando para os cálculos a Equação 1.

Nesse caso, foi utilizada para fins de cálculo uma variação de temperatura de 59 °C e foram consideradas duas condições extremas entre as temperaturas dos meios: resultado de temperatura no interior do *freezer*, sendo -24 °C, e temperatura externa (ambiente) de +35 °C.

Com esses dados efetuou-se o cálculo da taxa de transferência de calor em Watts, que circula nesses eletrodomésticos, por meio da Equação 3.

Para conseguir um sistema de tendência isotérmica e atender à necessidade e adequação do novo equipamento, alvo deste estudo, foi estabelecido que essa taxa deve ser melhor que os resultados de  $q_x''$  atualmente encontrados nos melhores casos de isolantes nesses eletrodomésticos, pois o novo equipamento precisa trabalhar com uma isolamento de extrema performance. Com essa perspectiva, foi então estabelecido que a melhor taxa de fluxo de calor encontrada nos eletrodomésticos atuais e de classificação “A” teria um incremento percentual de 20%. Para calcular uma nova espessura e com maior eficiência, atendendo à necessidade da nova tecnologia, recalculou-se utilizando a Equação 4.

$$q_{+20\%}'' = q_x'' \cdot 0,8 \quad (4)$$

Após a fixação do novo valor em , este foi aplicado, variando somente o gradiente de temperatura, nos quatro materiais aplicados neste estudo, para, assim, estabelecer um gráfico padrão para se dimensionarem rapidamente as paredes na concepção do projeto de um produto.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio do método numérico e do experimento apresentado na metodologia, foi possível apresentar os resultados no Gráfico 1.

Identificado que o poliuretano foi largamente empregado nos produtos para isolar as paredes, principalmente nos casos mais críticos, que apresentavam um  $\Delta T$  de 59 °C e espessura média de 0,07 m, decidiu-se tomar esse material nessa condição para calcular seu melhor  $q''_x$ , e este servir de base para os próximos cálculos do estudo. Calculando o fluxo de calor para o poliuretano, tem-se:

$$q''_x = 0,22 \cdot \frac{35 - (-24)}{0,07} = 185,43 \text{ W/m}^2$$

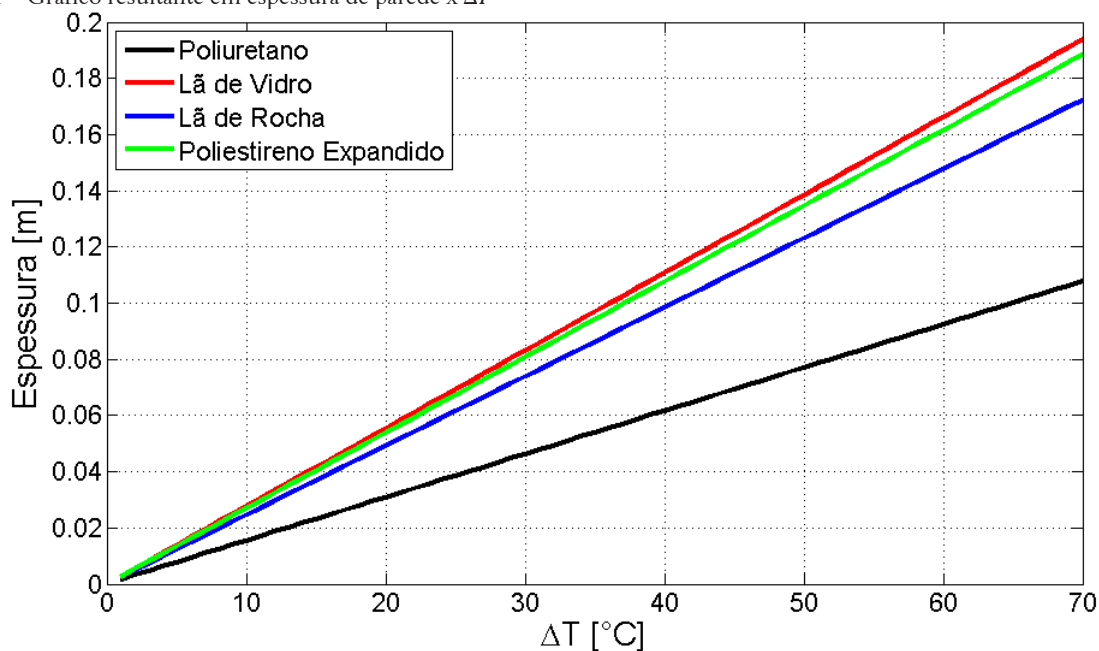
Com o valor de em seu melhor caso, aumentou-se 20% de eficiência:

$$q''_{+20\%} = 185,43 \cdot 0,8 = 148,34 \text{ W/m}^2$$

Assim padroniza-se o valor máximo de  $q''_x$  para o sistema. A partir desse valor, foi possível convertê-lo para os quatro materiais isolantes mais utilizados nesses produtos, possibilitando definir quais espessuras empregar para cada material, considerando apenas o  $\Delta T$  do sistema.

Por meio da Equação 3 gerou-se o Gráfico 1, que se torna, então, uma ferramenta no dimensionamento de paredes para produtos ou equipamentos que necessitem de tal característica isolante. Esse é o caso do equipamento desenvolvido por Gatti et al. (2014, p. 1), que compõe uma nova tecnologia; para o presente estudo, têm-se várias espessuras diferentes no equipamento, pois haverá um  $\Delta T$  específico para cada compartimento do novo equipamento.

Gráfico 1 – Gráfico resultante em espessura de parede x  $\Delta T$



Fonte: os autores.

Outra forma que poderá ser utilizada com os dados obtidos no estudo é o cálculo direto para cada material, sendo para o poliuretano a Equação 5, para a lã de rocha a Equação 6, para o poliestireno expandido a Equação 7, e para a lã de vidro usa-se a Equação 8. Esse conjunto de equações substitui o Gráfico 1 e as equações podem ser utilizadas independentemente do gráfico de apoio.

$$L_{\text{Poliuretano}} = 0,0015 \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$L_{\text{Lã de rocha}} = 0,0025 \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$L_{\text{Poliestireno Expandido}} = 0,0027 \cdot \Delta T \quad (7)$$

$$L_{\text{Lã de vidro}} = 0,0028 \cdot \Delta T \quad (8)$$

## 5 CONCLUSÃO

Com base no presente trabalho, foi possível criar uma ferramenta que poderá fazer parte do cotidiano do engenheiro que atua no segmento de desenvolvimento de eletrodomésticos, equipamentos para laboratórios ou aplicados à biomedicina e outros que tenham as mesmas características funcionais.

Com a ferramenta apresentada em forma de gráfico e equações matemáticas, tornar-se rápida a seleção de uma isolamento adequada ao se projetar um produto, que terá maior eficiência funcional, reduzindo os gastos energéticos, e um funcionamento com tendência isotérmica, ou seja, com 20% a mais de eficiência que os melhores casos nos quais essa ferramenta é empregada.

Conclui-se, ainda, que o melhor isolante comercialmente encontrado atualmente é o poliuretano, o qual, se for dimensionado em uma espessura otimizada, trará benefícios energéticos ao produto ao qual será empregado.

### ***Tool for sizing biomedical equipment with isothermal trend***

#### *Abstract*

*The present study shows a new tool for the design of insulating walls, dedicated to biomedical equipment that work with living cells in inner, having the need of a system with isothermal trend, because any change in temperature inside the equipment can cause damage to biological material, as in the case of sperm cells. This equipment must have a minimum thermal variation lost to the outside, because they work at low temperatures. Thus, this study will be very important for application in an equipment developed to artificial insemination in pigs, and, so, ensure that the new technology carries out its functions in a system with isothermal trend, because having a system without losses, it is possible to extend the lifetime of cells maintained and processed inside. With this perspective, a study was conducted on the thermal insulation currently used in equipment working with high temperature range ( $\Delta T$ ), in order to find a base parameter to meet the functional system of the new technology, enabling the correct sizing of the walls of the new product, with insulation superior to the currently found in the best cases. Based on these data, it was performed the calculation of heat flux  $q$  to get to a default value of this variable. The best value of  $q$  was found in 0.07 m thick polyurethane materials, in which  $q = 185,43 \text{ W/m}^2$ . After the calculations, it was established that this value is expected to increase 20% efficiency, being  $q_{+20\%} = 148,34 \text{ W/m}^2$ , to thereby have an isothermal trend, making the walls of the new equipment more technically viable. With the  $q_{+20\%}$  standard set, it was implemented on the four insulating identified in other existing equipment, generating equations and the graph to serve as easily applicable tool, taking into account only the material and the desired temperature gradient for the wall thickness with isothermal trend, which can be applied to appliances, biomedical equipment and others that have the same functional features.*

*Keywords: Thermal insulator. Sperm motility. Temperature gradient.*

## REFERÊNCIAS

- BAÊTA, F. da C.; SOUZA, C. de F. **Ambiência em Edificações Rurais: Conforto Térmico Animal**. Minas Gerais, Viçosa, 1997. 269 p.
- CORRÊA, N. M. et al. **Inseminação Artificial em Suínos**. Pelotas: Primpar, 2001.
- ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. Revisão técnica de K. R. Ismail. São Paulo: McGraw-Hill, 2009.
- DE LEEUW, F. E.; COLENBRANDER, B.; VERKLEIJ, A. J. The role membrane damage plays in cold shock and freezing injury. **Reproduction in Domestic Animals**, v. 1, n. 9, p. 95-104, 1991.
- GATTI, J. R. et al. Aumento de motilidade e redução de mortalidade espermática no processo de (ia) com sêmen fresco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MEDICINA VETERINÁRIA, 41., 2014, Gramado. **Anais...** Gramado, 2014.
- GONÇALVES, P. B. D.; FIGUEIREDO, J. R.; FREITAS, V. J. de F. **Biotécnicas Aplicadas à Reprodução Animal**. 2. ed. São Paulo: Roca, 2008.
- INCROPERA, F. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa: Técnicos e Científicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- INMETRO. **O Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <[http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca\\_o\\_programa.php](http://www2.inmetro.gov.br/pbe/conheca_o_programa.php)>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- JOHNSON, L. A. et al. **Storage of boar semen**. Animal Reproduction Science, 2000.
- LABORATÓRIO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS. **Condutividade térmica**. Disponível em: <[http://www.protocolab.com.br/Condutividade\\_Termica.htm](http://www.protocolab.com.br/Condutividade_Termica.htm)>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- MILCENT, P. F. **Extrato da Biografia de Benjamin Franklin: Noções de Isolamento Térmico de Tubulações**. Curitiba: UFPR, 2007.
- SPIRAX SARCO. Equipamentos Industriais Ltda de Portugal. **Dimensionamento Correcto do Isolamentos Térmico**. Portugal: Artécnica, 2010.
- TEXSA. **Tabela comparativa da condutividade térmica de diversos materiais**: Disponível em: <<http://www.texsa.com.br/Livro%2009.htm>>. Acesso em: 25 jan. 2016.
- WATSON, P. F., PLUMMER, J. M. The responses of boar sperm membranes to cold shock and cooling. In: INTERNATIONAL CONFERENCE BOAR SEMEN, 2., 1990, Betsville. **Anais...** Betsville, 1990. p. 187-196.
- YOSHIDA, M. **Conservation of sperms current status and new trends**: animal reproduction science, 2000.

